МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 678.549 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-319-327

Влияние температуры жидкости на скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах


И. Р. Антибас[1] ✉, **А. Г. Дьяченко**[1], **Саед Бакир Имад**[2]


[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]Университет Алеппо (г. Алеппо, Сирийская Арабская Республика)
✉ Imad.antypas@mail.ru

Введение. Снабжение людей качественной питьевой водой всегда имело первостепенное значение. Но её транспортировка по трубопроводным системам зачастую бывает связана с проблемами, вызываемыми, например, температурой воды и окружающей среды, а также возможностью возникновения гидравлических ударов на отдельных участках труб. В большей степени эти проблемы касаются систем, в которых используются трубы из полиэтилена. Температура — это один из наиболее важных факторов, влияющих на гибкость полиэтиленовых труб, и этот фактор оказывает влияние не только на проектирование водопроводных сетей, но и на капиталовложения в их развитие. Целью настоящих исследований явилось изучение влияния температуры воды и окружающей среды на свойства материала труб и скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах.

Материалы и методы. В проведенных авторами опытах применялся метод натурных исследований, когда для испытания используются специализированное оборудование и специально изготовленные для этих целей образцы. В данном случае использовались образцы труб из полиэтилена высокой плотности, которые подвергались испытаниям на растяжение на разрывной машине, причём каждый опыт проводился троекратно. В процессе проведения опытов образцы подвергались воздействию определённых температурных режимов (как внешних, так и внутренних), при этом исследовалось также влияние гидродинамического давления жидкости в трубе в результате изменения скорости жидкости в её секциях. Для этого в образцы подавалась жидкость под определённым давлением, чтобы выяснить влияние на трубы эффекта, известного как гидроудар.

Результаты исследования. В ходе исследования было установлено, что значение модуля упругости полиэтилена высокой плотности PE100 уменьшается с повышением температуры воды, причём величина снижения при температуре 60 °C достигает 60,21 % по сравнению с его значением при температуре воды +4 °C. В результате опытов по определению изменения модуля упругости полиэтилена с повышением температуры было выведено экспоненциальное уравнение для расчета значения полиэтиленового коэффициента как функции времени $E = 1{,}312e^{-0{,}01t}$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0{,}988$, а для расчета значения скорости распространения гидравлической ударной волны было выведено экспоненциальное уравнение как функции времени $C = 275{,}9e^{-0{,}01t}$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0{,}987$.

Обсуждение и заключения. В результате экспериментов было установлено, что вредное воздействие на стенки труб оказывает такое явление, как гидроудар, возникновение которого по возможности необходимо избегать ещё на этапе проектирования водопроводной сети. В ходе исследования было определено, что с увеличением температуры значения модуля упругости полиэтилена уменьшались при одновременном понижении значений скорости распространения гидравлической ударной волны.

Ключевые слова: полиэтиленовые трубы, температурный диапазон, гидроудар.

Для цитирования: Антибас, И. Р. Влияние температуры жидкости на скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Саед Бакир Имад // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 319–327. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-319-327

Liquid temperature effect on the hydraulic shock wave velocity in polyethylene pipes

I. R. Antypas[1], **A.G. Dyachenko**[1], **Saed Bakir Imad**[2]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] University of Aleppo (Aleppo, Syria)
✉ Imad.antypas@mail.ru

Introduction. Providing people with high quality drinking water has always come first. However, its transportation through pipeline systems was often associated with some problems, such as the temperature of the water and the environment, as well as the possibility of water hammer on certain pipe sections. This was especially true for systems that use polyethylene pipes. Temperature is a key factor affecting the flexibility properties of polyethylene pipes, and it affects not only the design, but also the investment in the development of water supply networks. The purpose of these studies was to study the effect of water and ambient temperature on the density, properties of the pipe material and the speed of propagation of a hydraulic shock wave in polyethylene pipes.

Materials and Methods. In the experiments performed, the method of field research was used, when tests are carried out on specialized equipment on samples specially made for the pursued purposes. Here, samples of high-density polyethylene pipes were used, which were subjected to tensile tests on a tensile testing machine, and each experiment was carried out three times.

In the course of the experiments, the samples were exposed to certain temperature regimes (both external and internal), while the influence of the hydrodynamic pressure of the liquid in the pipe was also investigated, as a result of the change in time of the liquid velocity in its sections. To do this, the samples were supplied with liquid under a certain pressure in order to find out the influence on the pipes of an effect known as water hammer.

Results. In the course of the research, it was found that the value of the elastic modulus of high-density polyethylene PE100 decreases with increasing water temperature, and the decrease at a temperature of 60° C reaches 60.21% compared to its value at a water temperature of +4° C. Based on the results of experiments to determine the effect of the elastic modulus of polyethylene with increasing temperature, an exponential equation was derived to calculate the value of the polyethylene coefficient as a function of time $E = 1.312e^{-0,01t}$ with the correlation coefficient $R^2 = 0.988$; and based on the results of the studies carried out to calculate the value of the propagation velocity of a hydraulic shock wave, an exponential equation was derived as a function of time $C = 275.9e^{-0,01t}$ with the coefficient correlation $R^2 = 0.987$.

Discussion and Conclusions. In the course of the research, it was found that such a phenomenon as water hammer has a harmful effect on the pipe walls, which, if possible, should be avoided even at the design stage of the water supply network. During the experiments, it was found that with an increase in temperature, the values of the elastic modulus of polyethylene decreased with a simultaneous decrease in the values of the propagation velocity of the hydraulic shock wave.

Keywords: polyethylene pipes, temperature range, water hammer.

For citation: I. R. Antypas, A. G. Dyachenko, Saed Bakir Imad. Liquid temperature effect on the hydraulic shock wave velocity in polyethylene pipes. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 319–327. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-319-327

Введение. Температура протекающей жидкости и температура окружающей среды оказывают существенное влияние на свойства материала труб, изготовленных из полиэтилена высокой плотности. При повышении температуры материал трубы становится более гибким, что приводит к снижению скорости распространения гидравлической ударной волны, а значит, и к снижению давления. Промышленно изготовленные полиэтиленовые трубы из PE100 (HDPE) являются термопластами, так как их пластичность варьируется в соответствующих пределах, зависящих от рабочих условий. Эти пластмассы имеют ряд преимуществ, в том числе сравнительно небольшой удельный вес, они дают возможность работать при низких температурах, способны выдерживать умеренное давление, обладают высокой коррозионной устойчивостью (особенно к кислотам и щелочам), хорошими электроизоляционными свойствами, легко окрашиваются и просты при установке. Они изготавливаются сразу большой длины, что сокращает при их прокладке количество соединительных элементов, которые считаются дорогими и хрупкими и вызывают проблемы,

связанные с утечками [1–6]. Полиэтиленовые трубы относятся к гидравлически гладким трубам, в которых потери энергии на трение в процессе протекания жидкости намного меньше, чем в металлических трубах, что приводит к экономии энергии перекачивания. Эти трубы характеризуются очень малым диапазоном шероховатости (k=0,001−0,008 мм), что в 3–20 раз меньше шероховатости новых стальных труб. Температура является одним из наиболее важных факторов, влияющих на свойства гибкости полиэтиленовых труб, и этот фактор не только влияет на проектирование и капиталовложения в различные сети снабжения питьевой водой при стабильности потока, но и вызывает нестабильное его течение в виде гидроудара в полиэтиленовых трубах [7–10]. Международные стандарты определяют свойства полиэтиленовых труб в сетях питьевого водоснабжения при температуре 20–23 °C, в то время как европейские стандарты определяют их при температуре 10 °C. Модуль упругости полиэтиленовых труб относительно велик при низких температурах водного потока, значение его понижается, когда при гидравлическом ударе температура потока повышается. Поэтому гидравлический удар может оказывать значительное влияние на стенки полиэтиленовых труб в сетях питьевого водоснабжения [11–14]. Цель настоящих исследований — изучение влияния температуры жидкости и температуры воздуха, окружающего полиэтиленовые трубы, на плотность, другие свойства материала труб и на скорость распространения в них гидравлической ударной волны.

Методы и материалы исследования. Гидравлический удар. Гидравлическим ударом называют увеличение или уменьшение гидродинамического давления жидкости в трубе в результате изменения скорости жидкости в её секции. Этот удар может создавать большое давление, которое необходимо учитывать при расчете толщины стенок трубы. Сжимаемость жидкости и склонность стенок трубы к деформации придают гидравлическому удару упругость, поскольку он представлен в виде волн давления, распространяющихся по трубе в нестабильном потоке. Различают два типа гидроудара:

1. Прямой гидравлический удар опасен и возникает, когда время остановки меньше периода гидравлической волны, $t_C < t_0$.

2. Косвенный гидравлический удар, который не опасен и срабатывает, когда время отключения больше периода гидравлической волны, $t_C > t_0$:

$$t_0 = 2L / C_j, \tag{1}$$

где t_0 — период гидравлической волны, с; L — длина трубы, м; C_j — скорость распространения гидравлической ударной волны, м/с; t_C — время закрытия или открытия клапана, с.

Прямой гидравлический удар возникает, когда на конце трубы внезапно открывается или закрывается клапан, соединенный с широкой поверхностью резервуара, или внезапно прекращается подача электроэнергии на насосную станцию. Изменение давления в результате прямого гидравлического удара определяется соотношением Жуковского-Леви:

$$\Delta P_{\max} = \rho_j \cdot C_j \cdot V_0, \tag{2}$$

где $\Delta P_{\max}$ — величина изменения высокого или низкого давления, Н/м^2;

ρ_j — плотность жидкости при установившемся расходе, кг/м^3; C_j — скорость распространения гидравлической ударной волны, м/с; V_0 — установившаяся скорость потока жидкости в трубе, м/с.

Что касается непрямого гидравлического удара, то он возникает при медленном открытии или закрытии клапана на конце трубы, соединенной с широкой поверхностью резервуара, или при увеличении времени остановки работы насосной группы на насосной станции. Величина изменения давления в результате непрямого гидравлического удара определяется следующим соотношением:

$$\Delta P_{\max} = 2\rho_j \cdot L \cdot V_0 / RT_c. \tag{3}$$

Величина скорости распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах определяется по следующей формуле:

$$C_j = \frac{\sqrt{\dfrac{E_{0j}}{\rho_j}}}{\sqrt{1 + \dfrac{D}{e} \cdot \dfrac{E_{0j}}{E_j} M}}, \tag{4}$$

где M — постоянная консолидации при $D/e > 40$

Для поддержки одной стороны трубы $M = 1,25 - \mu$, $M = 1 - \mu/2$, всей трубы — $M = 1 - \mu^2$; для труб без опоры (с компенсаторами) — М=1. Здесь μ — модуль Пуассона, составляет 0,45 для труб из HDPE [3–4]; E_{0j} — коэффициент упругости воды, Н/м^2; ρ_j — плотность воды, кг/м^3; D — внутренний диаметр трубы, м.

Скорость распространения гидравлической ударной волны в полиэтиленовых трубах находится в диапазоне 180–370 м/с [1, 9]. В таблице 1 представлены данные о физических свойствах воды при атмосферном давлении на её поверхности. На рис. 1 показано уменьшение плотности воды с увеличением температуры, а на рис. 2 — увеличение значения модуля упругости воды с повышением её температуры.

Таблица 1

Физические свойства воды при атмосферном давлении на её поверхности

Температура, °С	**0**	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
Плотность воды, кг/м^3	999,8	1000	999,7	998,2	995,7	992,2	988	983,2
Модуль упругости воды, ГН/м^2	2,02	2,06	2,1	2,18	2,25	2,28	2,29	2,28

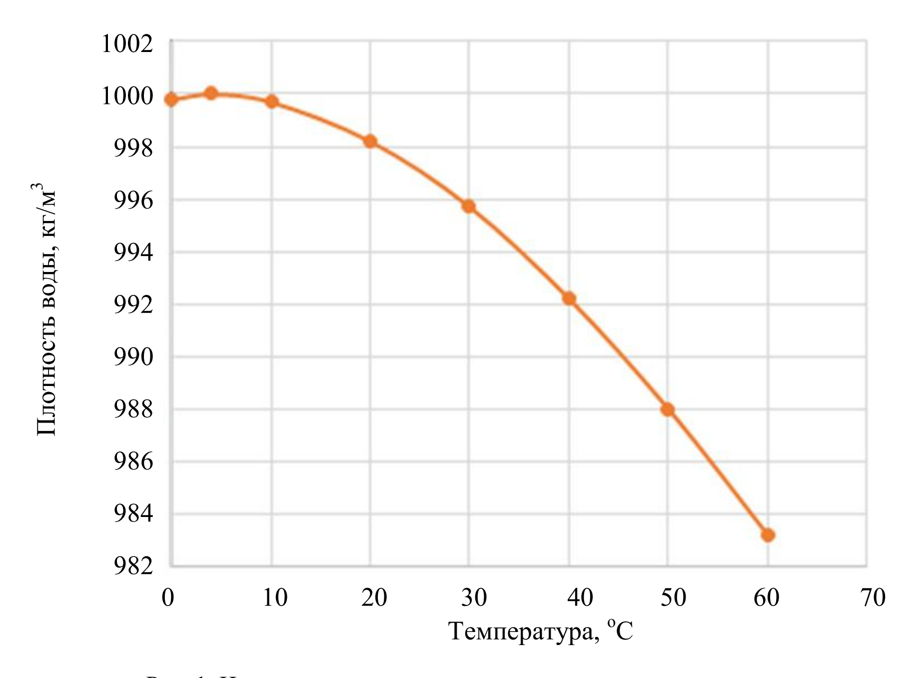


Рис. 1. Изменение плотности воды с повышением температуры

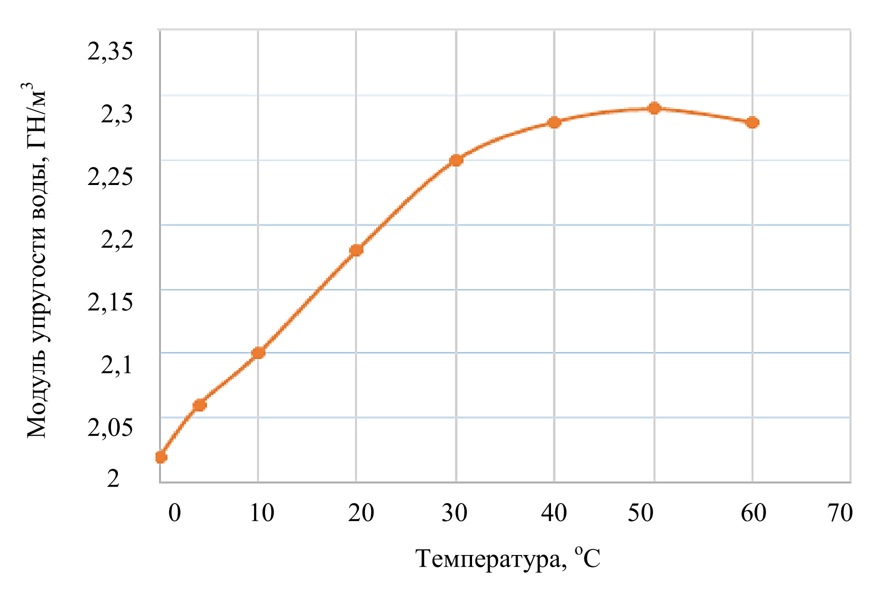


Рис. 2. Зависимость значений модуля упругости воды от температуры

В таблице 2 приведен модуль упругости материала трубы из полиэтилена при 16 °С [2, 10].

Таблица 2

Модуль упругости материала трубы из полиэтилена при температуре 16 °С

Модуль упругости полиэтилена, lb/in^2	**Модуль упругости полиэтилена, МН/м^2**	**Модуль упругости полиэтилена, lb/ft2**
150 000	1 030	22 000 000

Лабораторные испытания. Из полиэтиленовой трубы высокой плотности HDPE был изготовлен 21 образец. В ходе проведенных испытаний были измерены значения определенных характеристик, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

Технические характеристики труб из HDPE

D, mm	**e_{min}, mm**	**e_{max}, mm**	**PE**	**SDR**	**PN, MPa**
110	6,6	7,4	100	17	1

Для проведения исследований были выполнены следующие действия:

— выбраны и приняты значения температур, при которых производились испытания: 4, 10, 20, 30, 40, 50, 60 °С;

— для каждой из выбранных температур испытывалось по три образца;

— в ходе испытаний определялись физико-механические характеристики, средние значения которых приведены в таблице 4;

— образцы на растяжение нагревали в течение часа в цифровой электрической печи, затем растягивали с помощью специального устройства, полученные результаты представлены в таблице 4 и на рис. 3;

— полиэтиленовую трубку диаметром 110 мм заполняли водой при определенных температурах до момента её разрыва и рассчитывали относительную деформацию по формуле $\varepsilon = \Delta D / D$ (таблица 4).

Изменения упругих растягивающих напряжений в образцах труб из полиэтилена с внешним диаметром 110 мм при номинальном давлении 10 Бар и их деформации, измеренные при выбранных ранее температурах, анализировались в течение года. Полученные данные представлены в таблице 5 и на рис. 4.

Таблица 4

Максимальные значения упругих растягивающих напряжений и относительной деформации образцов из полиэтилена в соответствии с утвержденными температурами

Температура, °С	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
Средние значения упругих напряжений, МПа	29,576	26,074	23,656	22,340	19,716	18,426	17,229
Средние значения относительной деформации, %	0,0218	0,0226	0,0256	0,0275	0,0293	0,0306	0,0319

Таблица 5

Максимальные значения изменения упругих растягивающих напряжений для образцов из полиэтилена в зависимости от изменения температуры в течение года

Месяцы	**Январь**	**Февраль**	**Март**	**Апрель**	**Май**	**Июнь**
Упругие напряжения, МПа	28,16	31,30	26,49	26,01	24,71	24,64
Месяцы	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Упругие напряжения, МПа	23,32	22,02	24,20	24,27	25,40	27,57

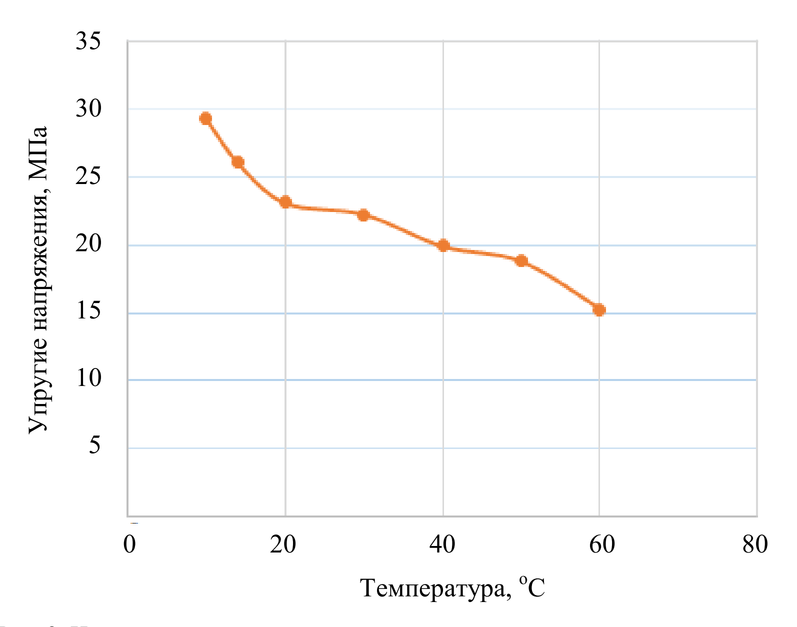


Рис. 3. Напряжения при растяжении полиэтилена при повышении температуры

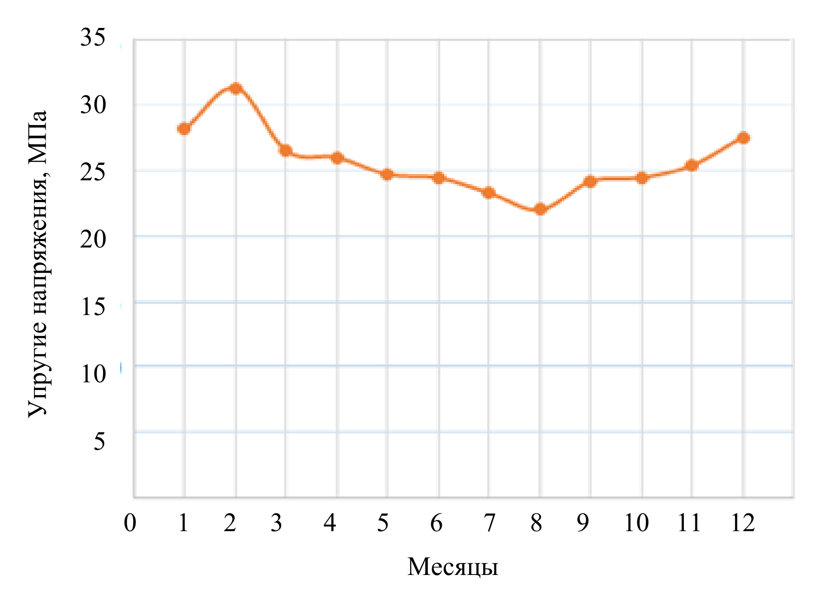


Рис. 4. Значения напряжений при растяжении образцов из полиэтилена в течение года

Результаты. Результаты обрабатывались по закону Гука следующим образом:

$$\varepsilon = \Delta D / D = \sigma / E \, , \tag{5}$$

где ε — относительная деформация; ΔD — изменение диаметра трубы, мм; D — диаметр трубы, мм; σ — напряжения растяжения в стенке трубы, МПа; E — модуль Юнга, МПа;

В таблице 6 приведены значения модуля упругости полиэтилена PE 100 и скорости распространения гидравлической ударной волны при при выбранных температурах.

На рисунке 5 показано уменьшение значения модуля упругости полиэтилена с увеличением температуры, а на рис. 6 — уменьшение значения скорости распространения гидравлической ударной волны с увеличением температуры.

Таблица 6

Значения модуля упругости полиэтилена PE 100 и скорости распространения гидравлической ударной волны при утвержденных температурах

Температура (°С)	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
Модуль упругости, Е (МПа)	1357	1154	924	812	673	602	540
Скорость гидравлической ударной волны, С (м/с)	280	259	233	219	200	190	180

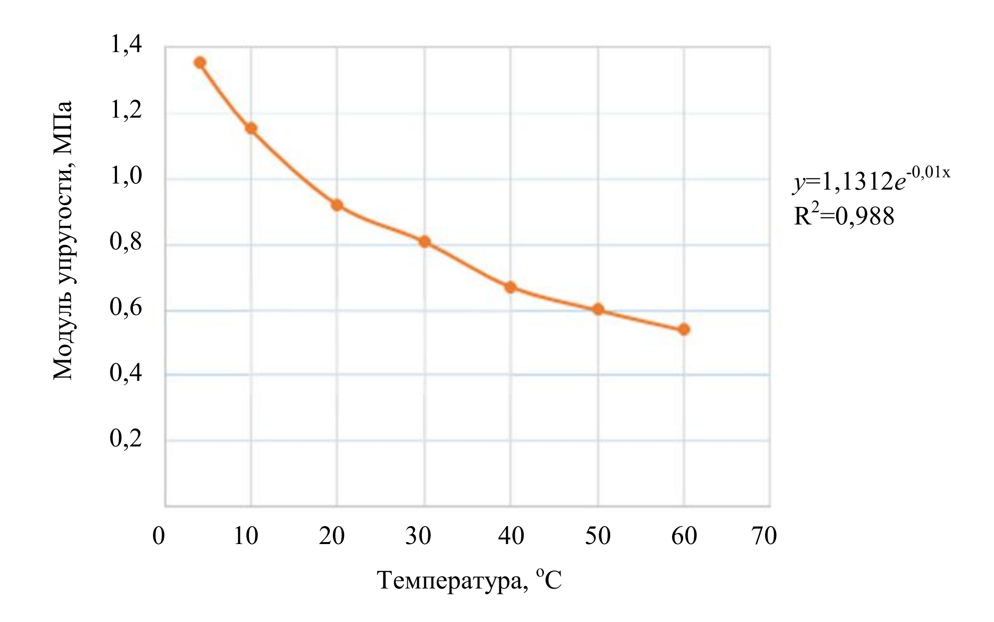


Рис. 5. Значения модуля упругости полиэтилена при повышении температуры

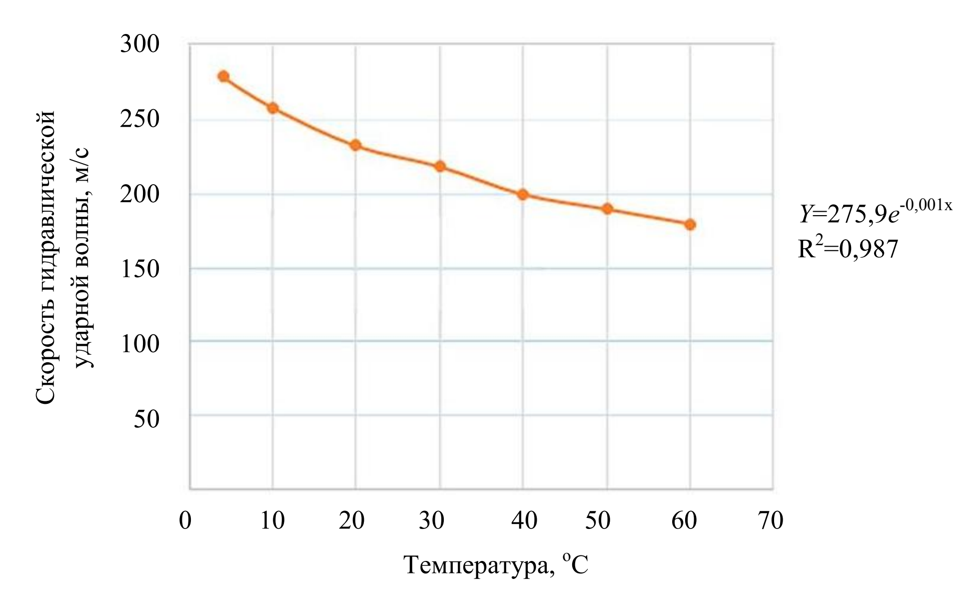


Рис. 6. Значения скорости распространения гидравлической ударной волны при повышении температуры

Обсуждение и заключения

На основании полученных данных, представленных на рис. 5, авторами выведено экспоненциальное уравнение для расчета значения коэффициента упругости полиэтилена как функции времени $E = 1{,}312e^{-0{,}01t}$. Коэффициент корреляции для данного уравнения составляет $R^2 = 0{,}988$.

На основании данных, представленных на рис. 6, получено экспоненциальное уравнение для расчета значения скорости распространения гидравлической ударной волны как функции времени $C = 275{,}9e^{-0{,}01t}$. Коэффициент корреляции для данного уравнения составляет $R^2 = 0{,}987$.

Проведя анализ результатов, полученных в ходе исследований, можно сделать следующие выводы:

— высокая температура воды оказывает существенное влияние на свойства материала труб из полиэтилена высокой плотности PE 100 и на гидравлические свойства ударной волны;

— значение модуля упругости полиэтилена высокой плотности PE 100 уменьшается с повышением температуры воды. Например, при повышении температуры от 4 до 60°C снижение значения модуля упругости достигает 60 %. Это приводит к значительному снижению скорости распространения гидравлической ударной волны. Величина снижения достигает порядка 35 %, что ведет к заметному снижению значения максимального изменения давления в результате гидравлического удара.

Библиографический список

1. Li Chao. The Research Status of the Wetting of Metal/Ceramic in the High Temperature Self-Lubricating Materials / Li Chao, Wang Yan Jun, Qin Ke, et al. // International Journal of Materials Science and Applications. — 2016. — Vol. 5. — P. 108–112. 10.11648/j.ijmsa.20160502.22

2. Amer Karnoub. Investigation of the impact behavior for composite materials reinforced by glass fibers / Amer Karnoub, Hajian Huang, Imad Antypas // Journal of Physics: Conference Series. Engineering and Innovative Technologies. — 2020. — Vol. 1515 — Art. 042081. 10.1088/1742-6596/1515/4/042081

3. Antypas, I. R. The influence of polyethylene processing on the plastic containers blowing / I. R. Antypas // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1515. — Art. 042042. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042042

4. Qingquan Lai. Enhanced wetting of dual-phase metallic solids by liquid metals: A new effect of interfacial reaction / Qingquan Lai, Lei Zhang, N. Eustathopoulos // Acta Materialia. — 2013. — Vol. 61, P. 4127–4134. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.03.039

5. Buekens, A. Recycling of WEEE plastics: a review / Alfons Buekens, Jie Yang // Journal of material Cycle and Waste Management. — 2014. — Vol. 16. — P. 415–434.

6. Antypas, I. R. Improvement of mechanical behavior of neoprene rubber by means of glass fiber / I.R. Antypas // Journal of Physics: Conference Series. Engineering and Innovative Technologies. — 2021. — Vol. 1889. — Art. 042007.

7. Wuyi Wan. Sensitivity analysis for the resistance on the performance of a pressure vessel for water hammer protection / Wuyi Wan, Wenrui Huang, Cong Li // Journal of Pressure Vessel Technology. — 2014. — Vol. 136. — Art. 011303. https://doi.org/10.1115/1.4025829

8. Yan Gao. Simplified dispersion relationships for fluid-dominated axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes / Yan Gao, Fusheng Sui, Jennifer M. Muggleton, et al. Journal of Sound and Vibration. — 2016. — Vol. 375. — P. 386–402. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.04.012

9. Jinzhe Gong. Detecting thinner-walled pipe sections using a spark transient pressure wave generator / Jinzhe Gong, Martin F. Lambert, Si T. N. Nguyen, et al. // Journal of Hydraulic Engineering. — 2018. — Vol. 144. — P. 1–8. 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001409

10. Lars-Eric Janson. Plastics pipes for water supply and sewage disposal / Lars-Eric Janson. — Stockholm: Borealis, 2003. — 404 p.

11. Twyman, J. Wave Speed Calculation For Water Hammer Analysis / John Twyman. — Obras y Proyectos. — 2016. — Vol. 20. — P. 86–92.

12. Espinoza-Moreno, G. Effect of the Temperature in Negative Pressure Wave Methods for Real Time Leak Location Applied to Plastic Water Pipelines / G. Espinoza-Moreno, O. Begovich // Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA. — Mexico: Cancún, Quintana Roo, 2014. — P. 564–569.

13. Chadwick, A. Hydraulics in civil and environmental engineering / Andrew Chadwick, John Morfett, Martin Borthwick. — CRC Press, 2021. — 652 p. 10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:9(724)

14. Wei-Li Wu. High density polyethylene film toughened with polypropylene and linear low density polyethylene / Wei-Li Wu, Yi-Wen Wang // Materials Letters. — 2019. — Vol. 257. — Art. 126689. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126689

Поступила в редакцию 04.10.2021
Поступила после рецензирования 25.10.2021
Принята к публикации 26.10.2021

Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, Scopus, Researcher, ORCID, imad.antypas@mail.ru

Дьяченко Алексей Геннадьевич, доцент кафедры «Основы конструирования машин», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, Scopus, ORCID, alexey-a2@mail.ru

Саед Бакир Имад, доцент кафедры «Сельскохозяйственное машиностроение» Университета Алеппо (САР, г. Алеппо, Университет Алеппо, механический факультет), доктор технических наук, доцент, ORCID, bakir-111@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. Р. Антибас и Саед Бакир Имад — научное руководство, постановка задачи, определение методологии исследования, сбор и анализ аналитических и практических материалов по теме исследования, критический анализ и доработка решения, компьютерная реализация решения задачи; А. Г. Дьяченко — анализ научных источников по теме исследования, критический анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.